

# CONTROL PREDICTIVO DE REACTORES CONTINUOS A NIVEL INDUSTRIAL

Aplicación en un Reactor de Oxido de Etileno.

**Msc. Espinoza, Milagros**  
Universidad Panamericana. Campus Guadalajara  
mespinoz@up.mx

---

*Palabras Claves: Control Predictivo,  
Reactor Químico.*

*Desde hace algunos años la creciente complejidad de los procesos industriales requiere de un avance en las técnicas de control hasta ahora utilizadas, diferentes propuestas han sido hechas, pero en el área de procesos; el control predictivo es la punta de lanza en técnicas avanzadas de control, se realiza un estudio del control predictivo y su aplicación sobre una planta real ubicada en un parque industrial, resaltando su efectividad sobre las estrategias de control PID hasta ahora utilizadas.*

---

## 1. - INTRODUCCION AL CONTROL PREDICTIVO.

Es bien conocido, que la naturaleza del proceso determina en gran parte que tan bien puede controlarse: la banda proporcional, los tiempos integrales y de derivada y el período de descripción de ciclos son todas las funciones del proceso. Los procesos que no se pueden controlar bien debido a su difícil naturaleza, esto es tiempo muerto variable, banda integral muy ancha, etc. Son muy sensibles a perturbaciones que provienen de cambios en la carga. Cuando se espera que un proceso difícil rechace estas perturbaciones, es posible que el control por realimentación ya no resulte satisfactorio por tres razones [1]:

- 1) La naturaleza de la realimentación implica que debe existir un error mensurable para generar una fuerza de restitución, de donde no es posible obtener el control perfecto, en el estado estacionario, la salida del controlador será proporcional a la carga, si se

tienen cambios en la carga la salida del controlador debe cambiar. Al pasar de una salida a otra, un controlador debe integrar porque, en cada estado estacionario, la proporcional y la derivada en nada contribuyen.

Como consecuencia, se ha mostrado que el cambio neto en la salida es una función del error integrado:

$$\Delta m = \frac{100}{PI} \int edt$$

Cualquier combinación de banda ancha y tiempo integral largo (característica de los procesos difíciles) conduce a un serio error integrado por cambio unitario en la carga:

$$\frac{\int edt}{\Delta m} = \frac{PI}{100}$$

- 2) El controlador con realimentación no puede determinar cuál debe ser su salida para cualquier conjunto dado de condiciones y, de este modo, cambiar su salida hasta que concuerden la medición y el punto de control; resuelve el problema de control por tanteos, lo que es característico de la respuesta oscilatoria de un circuito por realimentación. Este es el modo más primitivo de resolución del problema de control.
- 3) Cualquier circuito de retroalimentación tiene un período natural característico. Si ocurrieran perturbaciones a intervalos menores que alrededor de tres periodos, es evidente que

nunca se alcanzaría el estado estacionario.

Existe una manera de resolver directamente el problema de control, conocido como control con corrección anticipante o control predictivo. Se miden los factores principales que influyen en el proceso y, junto con el punto de control, se usan para calcular la salida corregida que satisfaga las condiciones en curso. Siempre que se presente una perturbación, de inmediato se inicia una acción correctiva, para cancelar la perturbación antes de que altere la variable controlada. Teóricamente, la corrección anticipante puede realizar un control perfecto, sin soportar la dificultad del proceso, quedando sólo limitado su rendimiento por la exactitud de las mediciones y de los cálculos.

En la práctica, el sistema de control predictivo realiza un balance continuo del material o la energía entregada al proceso, contra las demandas de la carga. Como consecuencia, los cálculos que realiza el sistema de control son balances de material y de energía sobre el proceso y, por lo tanto, las variables manipuladas deben ser gastos regulados con precisión.

## 2. -FUNDAMENTOS DE LA LEY DE CONTROL PREDICTIVO.

Para poder desarrollar un procedimiento de diseño es necesario adaptarlo a la plataforma donde será utilizada, tal es el caso de la plataforma Foxboro [2]. Primeramente se describe un teorema como base de partida:

**Teorema # 1 [2]:** Sea la planta P descrita por la siguiente representación en variables de estado

$$z(tk + 1) = A_z(tk) + B\lambda u(tk)$$

$$y(tk) = C_z(tk)$$

Entonces, la salida puede ser calculada recursivamente como:

$$y(t + j) = CA^j z(tk) + \sum_{i=0}^{j-1} CA^{j-i-1} B\lambda u(tk)$$

La matriz predictiva  $G_{N123}$  se calcula sobre:

$$G_{N123} = \begin{bmatrix} CA^{N_1} B & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & 0 \\ CA^{N_2} B & \dots & CA^{N_2-N_1} \end{bmatrix}$$

con:  $N_1 = td$

$N_2 > 2td - 1$

$N_1$  y  $N_2 =$  Horizontes de Control

$td =$  Retardo de la Planta.

La ley de control H entonces, estará descrita por:

$$H = (G_{N123}^T G_{N123} + \lambda I)^{-1} G_{N123}^T$$

Para el caso de estudio la solución de la matriz es la primera fila de la matriz H. Esto puede ser escrito de la siguiente manera:

$$Kpre = [1 \ \dots \ 0] (G_{N123}^T G_{N123} + \lambda I)^{-1} G_{N123}^T$$

Para  $Kpre$  como la matriz de control correspondiente. Ahora, el teorema anteriormente presentado sirve de base para estructurar el algoritmo desarrollado por [2] para este trabajo.

## 3. - DESCRIPCION DEL REACTOR DE OXIDO DE ETILENO.

La planta a estudiar [3] es un reactor tubular que contiene alrededor de 8800 tubos de  $11/2" \phi \times 10$  mts. de longitud de acero al carbón. Dentro del tubo existe un lecho catalizador soportado por unos resortes, esto con la finalidad de mantenerlo en la misma posición durante todo el proceso.

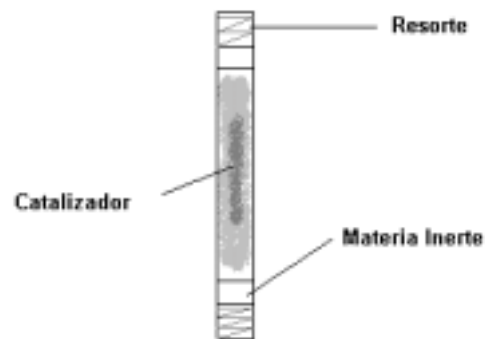
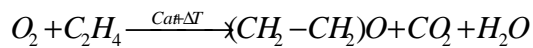


Figura #1: Tubo del Reactor

A través de estos tubos circula el gas con una mezcla rica en etileno, ante la presencia del catalizador [3]:



Como la reacción es exotérmica, esto es, genera calor se necesita un control de temperatura, esto para evitar que toda la reacción se vaya a CO<sub>2</sub> a la vez que incrementa la producción de Oxido de Etileno o.

La temperatura del reactor se controla a través de una carcaza con agua de caldera; mediante la absorción de calor se genera vapor y este debe ser regulado.

El agua de caldera llega entre 160° y 170° se debe realizar un precalentamiento para evitar un choque térmico llegando a 180° y 190°, mediante la acción de termo sifón la densidad del agua baja saliendo a través de 8 salidas, este vapor sale saturado, para luego separar el agua y el vapor, este ultimo pasa nuevamente a la red de vapor donde es reutilizado.

Actualmente el control de temperatura del reactor se realiza a través de un algoritmo PID que regula la presión de la carcaza, la Fig#2. ilustra el esquema actual:



Figura #2: Esquema del Control de Temperatura Actual.

En el caso particular de estudio se desea mantener la temperatura del Reactor a 250°.

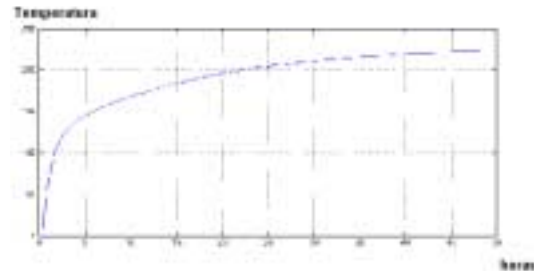
#### 4. - APLICACION DE LA METODOLOGIA SOBRE EL REACTOR CONTINUO.

Antes de aplicar la metodología de control de debe establecer los criterios de desempeño deseados:

- Sistema libre de oscilaciones.
- Tiempo de estabilización < a 3 horas
- Buen rechazo a perturbaciones mensurables y no mensurables.
- Fácil de implementar en el sistema SCADA instalado en planta.

Además se procederá a comparar el esquema de control predictivo, con la lógica tradicional basada en un control PI sintonizado con la técnica de Ziegler-Nichols [4].

Primeramente se analizara el sistema bajo la acción de un control con PI que actualmente posee la planta, tal y como lo muestra la Fig#3:

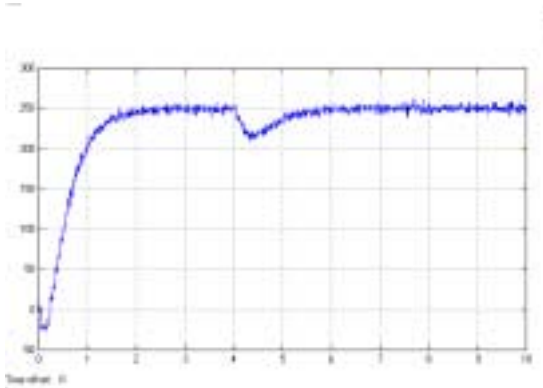


Figura#3: Desempeño del sistema con un PI

Cuyas ganancias son Kp=9 y Ki=1. Se puede apreciar una respuesta estable aunque exageradamente lenta, de hecho, el arranque de dicha planta hasta llegar al punto donde opera normalmente es de aproximadamente 2 días, es de hacer notar que ante perturbaciones mensurables, cambios en el setpoint, etc. Esta dinámica lenta hace extremadamente ineficiente la planta pues en estos períodos no se obtiene el producto deseado, lo que perjudica las etapas subsiguientes dentro del parque industrial, es por ello que se recurre a técnicas de control avanzado con el objeto de optimizar los procesos, siendo la técnica seleccionada para el estudio en particular, la técnica de control predictivo.

El primer paso en la aplicación de un controlador predictivo es la obtención de un modelo matemático del proceso, esto se hizo utilizando un algoritmo novedoso desarrollado por [2] para la identificación de procesos a Lazo Abierto y a Lazo Cerrado, se hizo una identificación a L.A al colocar el controlador PI en manual.

Una vez obtenido el modelo se realizan los cálculos para la estimación del controlador predictivo utilizando programación dinámica [5], al obtener el controlador se elimina el PI y se conecta el controlador predictivo para obtener la siguiente respuesta:



Figura#4: Respuesta ante un Controlador Predictivo

Como se puede apreciar en la Fig#4, el reactor posee una salida libre de oscilaciones, alcanzando la estabilidad al cabo de las tres horas, cumpliendo con los criterios de desempeño fijados anteriormente, posee buena tolerancia ante perturbaciones mensurables, en este caso fue sometida a una perturbación del 20% producto de una variación de la temperatura del agua de la caldera que suministra el vapor, así mismo, posee una alta tolerancia al ruido industrial, el cual se puede ver en la figura y que a su vez no altera el desempeño del sistema a largo plazo.

Esto es posible, debido a que el controlador predictivo realiza los cálculos de predicción basado en la salida estimada de un modelo de proceso, lo que le permite adelantarse en varios pasos a la salida corrigiendo su trayectoria hasta alcanzar la deseada, a diferencia de su contraparte el PI que realiza la corrección en base a la información pasada del error, lo que literalmente mantiene "adivinando" al controlador para alcanzar la salida y por ende la trayectoria deseada.

Es en estos procesos donde el controlador predictivo resulta la opción más viable para aplicar una estrategia de control en el ámbito industrial

## 5. - CONCLUSIONES.

Se ha podido desarrollar una metodología para la aplicación de control predictivo en el ámbito industrial, resaltando su alta eficiencia sobre la lógica tradicional, pudiendo obtener una realización que puede ser implementada en el SCADA que actualmente posee la

planta. Se prevé en un futuro fortalecer este algoritmo de control mediante el uso de técnicas de programación Neurodinámicas.

## 6. -BIBLIOGRAFIA

[1] F, Shinskey. **Sistemas de control de procesos.** Tomo I y II. Mcgraw – Hill. (1996)

[2]H, Aboukheir. **Diseño de un controlador predictivo para una torre desoxigenadora.** USB, 2001

[3] K, Ogata. **Ingeniería de control moderno.** Prentice – Hall. (1993)

[4] Anderson, Moore. **Optimal Control: Linear Quadratic Methods.** Prentice – Hall (1981).

[5] E, Camacho. C, Bordons. **Predictive control in a wide class of industrial process.** Vol 24 No 3. (1998)